

ИЗУЧЕНИЕ МЕТОДОМ НАНОИНДЕНТИРОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СУБМИКРОКРИСТАЛЛОВ ОБРАЗЦОВ СПЛАВА В95, ПОЛУЧЕННЫХ ДИНАМИЧЕСКИМ ПРЕССОВАНИЕМ

Петрова А.Н.^[2], Храмова Н.В.^[3]

Руководители: Бродова И.Г.^[2], Чикова О.А.^[1]

[1] - Уральский государственный федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

[2] – Институт физики металлов УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

[3] – Уральский государственный педагогический университет, г.

Екатеринбург

E-mail: natlja.hramowa55555@yandex.ru

Алюминиевый деформируемый термически упрочняемый сплав В95 (Al-6%Zn-2%-1,6%Mg-2%Cu) имеет структуру состоящую из α -твердого раствора и вкраплений упрочняющей фазы $MgZn_2$. Образцы сплава В95 подвергают динамическому прессованию с целью получения материала с более высокой прочностью.

Механические свойства металлических кристаллических материалов с микро- и нанозеренной структурой зависят не только от размеров составляющих материал структурных единиц, но и от их механических свойств. Актуально изучение закономерностей изменения механических свойств субмикроскопических зерен сплава В95 в зависимости от степени деформации при прессовании.

В работе исследованы массивные образцы сплава В95 с субмикрокристаллической структурой полученные методом динамического прессования. Деформация со скоростью порядка 10^5 с^{-1} осуществлялась с помощью импульсных источников. Матрица представляла собой два пересекающихся под углом 90° канала. Поверхность образцов сначала полировали механически, а затем электрохимически до высоты неровностей $\sim 10 \text{ нм}$. Модуль Юнга и твердость отдельных субмикрокристаллов измеряли в условиях непрерывного нагружения линейно нарастающей во времени нагрузкой до 1 мН при комнатной температуре. Измерения проводили с помощью Наносклерометрического модуля Зондовой НаноЛаборатории NTEGRA. Данный метод измерения модуля Юнга E , ГПа и твердости H , ГПа основан на измерении и анализе зависимости нагрузки при вдавливании индентора в поверхность материала от глубины внедрения индентора. Данный метод является неразрушающим и позволяет проводить корректные измерения модуля упругости в диапазоне абсолютных значений от 50 до 1000 ГПа. При этом минимальный размер участка для измерений составляет порядка 200 нм. В основе метода лежит использование пьезорезонансного зондового датчика камертонной конструкции с высокой изгибной

жесткостью консоли ($\sim 10^4$ Н/м), что позволяет использовать зонды с жесткостью в 1000 раз выше, чем жесткость стандартных зондов для АСМ. Оригинальная конструкция и принцип работы зонда позволяет различать вязкую и упругую составляющую силы взаимодействия между иглой зонда и поверхностью. Эта особенность позволяет различать твердую поверхность под вязким адсорбированным слоем и проводить измерения на открытом воздухе без специальной подготовки образцов. Благодаря этому также можно оценить долю упругой составляющей в общей деформации, которую характеризует упругое восстановление $R = (h_m - h_f)/h_m$, где h_m – наибольшая глубина погружения, h_f – глубина после снятия нагрузки. При проведении индентирования на поверхность образца наносили серию индентов. Далее проводили анализ нанесенных индентов, по результатам которого определяли твердость и модуль упругости фазовых составляющих исследуемого образца – раствора олова в алюминии и эвтектики. Анализ заключался в подборе параметров степенной функции, описывающей экспериментальные зависимости глубины погружения индентора от приложенной нагрузки, а также зависимость площади контакта от приложенной нагрузки (метод Оливера-Фарра). Перед нанесением индентов выбранную область поверхности образца сканировали. Это позволяло убедиться в том, что поверхность образца ровная и никакие дефекты не окажут влияние на проведение измерений. Для каждого нанесенного индента была получена зависимость приложенной нагрузки от координаты зонда. Модуль Юнга и твердость субмикрорекристаллов определялись в результате 50 измерений. По полученным данным вычисляли выборочное среднее значение и выборочное среднее квадратическое отклонение (или дисперсию) значений модуля Юнга и твердости. Калибровка наносклерометрического модуля осуществлялась по пластине, изготовленной из плавленого кварца, с известными значениями модуля Юнга и твердости. Твердость в использованном нами методе Оливера и Фарра является твердостью по Мейеру НМ, которая является средним контактным давлением на контактной поверхности «индентор – образец» и хорошо коррелирует с напряжением течения. Степень деформации, при которой материал переходит в состояние пластичности, определяли как ненулевое решение системы двух уравнений и находили соответствующее значение напряжения — σ_t . Характеристику пластичности рассчитывали по отношению площадей по диаграмме непрерывного вдавливания по формуле: $\delta_A = 1 - \frac{A_e}{A_t}$, где A_e – площадь под кривой разгрузки; A_t – площадь под кривой нагружения.

Средствами СЗМ установлено, что формирование субмикрорекристаллической структуры сплава В95 с размером фрагментов порядка 500 нм наблюдается уже при одном проходе образца через два пересекающиеся под углом 90° каналы при скорости движения 150 м/с (размер зерен в исходном образце – 5 мкм). Повторное применение ДКУП

не приводит к измельчению составляющих субмикроструктурной структуры.

Таблица 1. Механические свойства субмикроструктурных литов

Степень деформации	Размер зерна (данные СЗМ), мкм	σ_t , ГПа	δ , %	R_{\max} , %	E, ГПа	НМ, ГПа	НМ/Е	S_E	S_H
Репер	Более 5	7	83	12	73	4,185	0,057	37	0,003
ДКУП, 1 проход, 150м/с	Порядка 0,5	12,5	69	24	84	4,082	0,049	62	0,003
ДКУП 2 прохода, 150 м/с	Порядка 0,5	22,5	80	13	63	4,450	0,071	43	0,003

По полученным данным вычислили выборочное среднее значение и выборочное среднее квадратическое отклонение (или дисперсию) S_E . Из сравнения сгруппированных выборок можно заключить, что применение ДКУП приводит к появлению в микроструктуре образца субмикроструктур с повышенным (до значений 100-110 ГПа) модулем Юнга E. Повторное применение ДКУП к образцу приводит к формированию в микроструктуре сплава зерен с пониженным относительно исходного образца значением модуля Юнга E - 50 ГПа. Среднее значение модуля Юнга в первом случае возрастает от 73 ГПа до 84 ГПа и дисперсии S_E от 37 до 62 (Таблица 1). Во втором случае, когда применяют повторное ДКУП среднее значение модуля Юнга уменьшается до 63 ГПа, дисперсия S_E до 43 (таблица 1). Согласно, дисперсия параметров микроструктуры сплавов, например, твердости, является мерой их структурной и химической микронеоднородности. Дисперсия модуля Юнга субмикроструктурного образцов сплава В95 в первом случае может быть рассмотрена как мера интенсивности воздействия ДКУП на структуру сплава, во втором - мера интенсивности технологического воздействия ДКУП на структуру сплава с целью повышения ее однородности при последующей обработке давлением.

Результаты измерения твердости исследованных образцов представлены в таб. 1 и свидетельствует о том, что однократное применение ДКУП приводит к незначительному понижению значений НМ (на 2%) с существенным увеличением дисперсии (практически на 40%). Повторное применение ДКУП вызывает повышение значений НМ на 6% с увеличением дисперсии на 16% по отношению к реперу. Данные расчетов свидетельствуют о том, что ДКУП приводит к существенному росту текучести и показывают, что однократное применение ДКУП приводит к понижению пластичности δ от 83% до 69%, повторное применение ДКУП повышает текучесть практически до первоначального уровня - 80%, что коррелирует с изменением НМ и отношения НМ/Е.